

국내. 외 철도차량 진동규격 비교 분석 연구

Comparative Analysis on Rolling Stocks Vibration Standards done at Home and a Broads

김종걸, 심중호

성균관대학교 시스템경영학부

경기도 수원시 장안구 천천동 300

Kim Jong-gurl · Shim Jung-ho

School of Systems Management Engineering, Sung Kyun Kwan University

Abstract

It is an hot issue to reduce vibration for improving quality, reliability and safety in railway vehicles including magnetic levitation, monorail way, surface car etc. This paper aims at literature survey in rolling stocks vibration standards

Initially, it has been evaluated by researching and analysing of foreign standards to judge wheather or not the standards being applied in domestic are reasonable and scientific. After that we are proposing the standards of vibration after comparing and analysing the ones in domestic and foreign.

1. 서 론

최근 산업발달과 더불어 증가하는 자동차수에 밀려 도심의 도로와 고속도로는 원활한 교통량을 보장 받지 못하고 있어 운송소요시간이 불규칙해져 평균수송량이 감소했으며 이로 인해 운송효율이 급격히 저하되었다. 따라서 많은 인원을 한 번에 수송하며 먼 거리를 짧은 시간으로 갈 수 있다는 장점과 비교적 싼 가격으로 정확한 운송시간을 보장하는 철도차량과 같은 운송수단의 확대가 절실하게 되었다. 각 도시에서는 전기 철도차량인 지하철을 운영하여 수요를 충족시켰으며 각 지역 간에는 기존의 궤도를 이용하는 차량의 운송횟수를 늘리거나 구간을 확장하여 수요인원을 증가시켰다. 그러나 최근, 계속된 수요의 증가로 인해 기존 방식의 철도차량 운송능력도 포화상태에 이르게 되었고 현 철도차량으로는 고객만족을 시키지 못하자 빠르고 편리하며 안전한 양질의 운송수단에 대한 요구가 점차 높아져 신교통, 수단의 필요성으로 새로운 개념의 철도차량이 급속한 기술발전으로 변화하고 있다. 이러한 신 개념의 철도차량(자기 부상, 모노레일, 노면전차 등)에 대한 다양한 사용 환경에서의 품질, 신뢰성과 안전성을 확보하는 일이 시급한 과제로 대두되고 있다. 그 중에서 진동은 철도차량의 품질과 신뢰성 문제에서 주요인자이다. 본 연구에서는 국내, 해외 철도차량의 진동규격을 비교, 분석하여 차후 진행되어야 할 진동시험규격을 제안하고자 한다.

2. 철도차량 진동규격 사례조사

국내. 외 철도차량 규격을 보면 진동규격이 많지 않다. 국내 규격을 보면 사인(정현) 진동을 이용한 대표적인 규격으로 KS R 9144, KS R 9186이 있고 충격시험으로는 반사인파를 이용한 KS R 9146이 있다. 국내 철도차량의 모든 제품이 이 규격으로 내구성 평가를 받는다고 볼 수 있다.

해외규격은 타 규격도 많지만 IEC 61373이 대표규격이라 할 수 있다. 현재 국내 제조업체에서 생산되어 해외 프로젝트로 진행된 규격은 95%이상 이 규격으로 진행된다고 볼 수 있다.

표 1. 대표적인 진동시험 규격

구 분	시험 규격	시험 규격명	적용 범위
국내	KS R 9144	철도차량부품의 진동시험방법	철도차량에 장착하는 모든 기기 및 부품
	KS R 9186	철도신호 보안부품-진동시험방법	철도에 관련된 지상용 모든 기기 및 부품
	KS R 9146	철도차량부품의 충격 시험방법	철도차량에 장착하는 모든 기기 및 부품
해외	IEC 61373 EN 61373	Railway applications rolling stock equipment shock and vibration tests	철도차량에 장착하는 모든 기기 및 부품

2.1 국내 진동시험규격 적용 범위 및 사례

국내 철도차량 규격 중 가장 많이 쓰는 규격은 KS R 9144 (철도차량부품의 진동시험 방법)로 철도차량의 자체, 대차 등에 부착하는 기기 및 부품을 진동시험기에 부착하여 시험하는 일반적인 진동시험방법으로 철도차량 자체, 대차에 부착하는 부품, 기기에 100% 적용되는 시험규격이다.

또, 다른 국내규격으로 KS R 9186 (철도신호 보안부품 - 진동시험방법)로 철도의 신호 보안 설비의 신호기, 릴레이 설치 장치, 기구 상자, 동력 전철기, 레일 등에 설치하는 기기 및 부품(이하 부품이라 한다.)에 대하여 진동시험기에 설치하여 실시하는 일반적인 진동 시험(이하 진동 시험이라 한다.) 방법에 대하여 규정한다. 다만 차량에 탑재하는 신호 보안 부품에는 적용하지 않는다. 이 규격은 에 100% 적용되는 시험규격이다.

진동시험규격과 함께 충격시험이 이루어지고 있는데 KS R 9146 (철도차량 부품의 충격 시험방법) 이 규격은 철도차량의 차체, 대차의 용수철 윗부분에 부착하는 기기 및 부품을 충격시험기에 부착하여 실시하는 일반적인 충격시험방법으로 자체, 대차 등에 부착하는 기기 및 부품은 물론 지상에 설치되는 철도관련 모든 기기 및 부품에 사용하는 규격으로 최근에는 50%정도 적용되는 규격이다.

각 규격에 대한 공통적인 조건으로

- (1) 기기 단독으로 시험할 수 없는 것. 또는 무게가 100kg이상인 경우는 그것을 구성하고 있는 각 부품에 대하여 진동시험을 하여도 좋다.
- (2) 진동시험은 원칙적으로 공진시험, 진동기능 시험 및 내구성 시험의 순서로 한다. 단, 공진시험 및 진동기능시험은 병행하여 동시에 하여도 좋다.
- (3) 부품은 진동시험기 위에 원칙적으로 거의 사용 시에 가까운 부착방법 및 부착자세로 부착한다.
- (4) 진동기능 시험은 부품의 작동상태에서 시험하나 공진시험 및 진동내구시험은 특별히 지장이 없는 경우, 무작동 상태에서 한다. 다만, 진동내구시험의 경우는 시험 개시 전 및 종료 후에 대하여 부품의 작동상태를 비교 한다
- (5) 부품의 부착 자세에 대한 전후, 좌우 및 상하의 직교 3방향의 단진동을 임의의 순서로 준다. 또한, 전후, 좌우 및 상하 방향이란, 차량에 부착된 방향과 동일

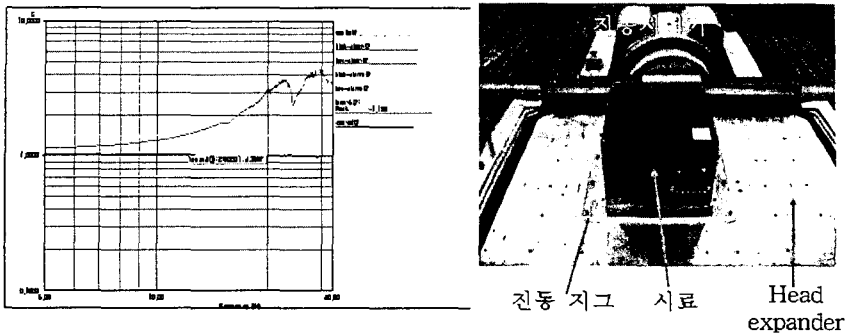


그림 1. 공진. 기능 사진 및 데이터

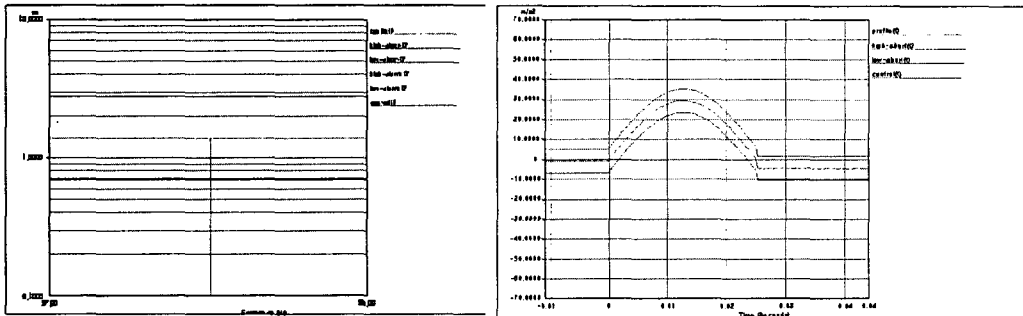


그림 2. 내구성시험 및 충격시험 데이터

2.2 해외 진동시험규격 적용 범위 및 사례

해외철도차량규격은 IEC 60077, RIA 20 등 많은 시험규격이 사용되었으나 최근에는 IEC 61373 규격을 사용하고 있다. 국내철도차량이 해외 수주를 많이 받아 제작이 이루어지고 있고 해외제작 차량에 국내 기기나 부품이 장착되고 늘어나면서 전 세계적으로 공용화되는 IEC 61373 규격 적용은 매년 평균 30%이상씩 늘어나고 있고 다른 규격을 적용한 사례는 극히 일부로 차후 국내 철도차량에서도 도입이 되리라 생각한다.

이 규격의 특징은 국내시험규격과 달리 사인(정현)진동을 이용하지 않고 랜덤파형을 이용하여 기능시험, 내구성시험, 충격시험을 한 사이클로 이루어 시험을 진행하게 된다. 적용범위를 보면 철도차량의 자체, 대차 등에 부착하는 기기 및 부품을 진동시험기에 부착하여 시험하는 일반적인 진동시험방법으로 철도차량 자체, 대차에 부착하는 부품, 기기에 100% 적용되는 시험규격이다. 각 축의 가속도 값은 상이하고 시험시간은 동일하지만 충격시험은 각 축의 시험회수는 같지만 가속도 값은 두 축은 같고 한 축만 충격값이 높다.

이 규격의 요구사항을 살펴보면

- (1) 기기 단독으로 시험할 수 없는 것. 또는 무게가 100kg이상인 경우는 그것을 구성하고 있는 각 부품에 대하여 진동시험을 하여도 좋다.
단, 시료 무게에 따라 시험주파수가 상이함.
- (2) 진동시험은 원칙적으로 기능적 임의테스트, 모의적 수명 테스트, 충격테스트 순서로 한다.
- (3) 부품은 진동시험기 위에 원칙적으로 거의 사용 시에 가까운 부착방법 및 부착자세로 부착한다.
- (4) 진동기능 시험은 부품의 작동상태에서 시험하나 공진시험 및 진동내구시험은 특별이 지장이 없는 경우, 무작동 상태에서 한다. 다만, 진동내구시험의 경우는 시험 개시 전 및 종료 후에 대하여 부품의 작동상태를 비교 한다
- (5) 부품의 부착 자세에 대한 전후, 좌우 및 상하의 직교 3방향을 임의의 순서로 준다.
또한, 전후, 좌우 및 상하 방향이란, 차량에 부착된 방향과 동일

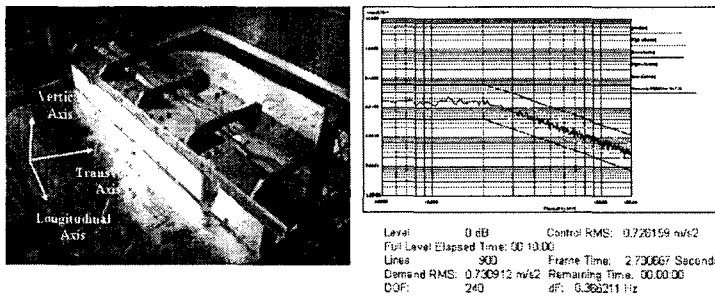


그림 3. 기능적 임의 테스트 사진 및 데이터

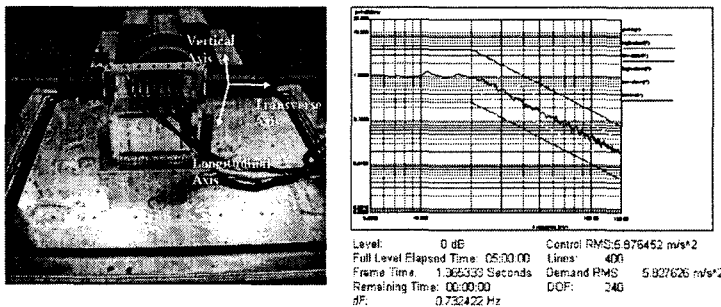


그림 4. 모의적 수명 테스트 사진 및 데이터

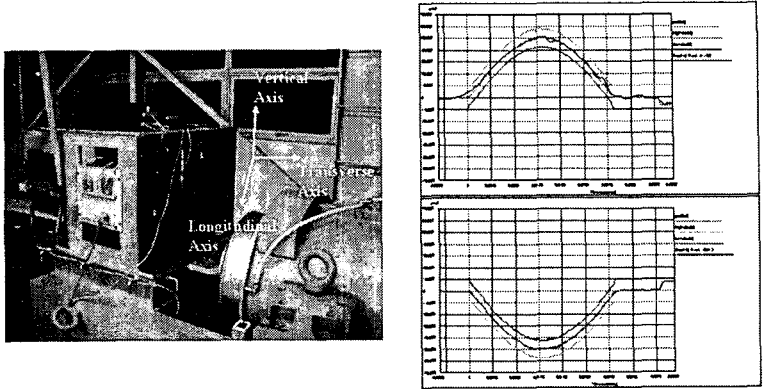


그림 5. 충격 테스트 사진 및 데이터

3. 각 규격 분석 및 비교 분석

모든 국내철도차량의 규격을 적용하고 있는 사인(정현)진동시험(KS)과 해외 모든 프로젝트에 적용하고 있는 해외규격(IEC, RIA)인 랜덤진동시험의 가장 큰 차이는 사인(정현)진동과 랜덤진동의 차이라 볼 수 있다.

이 장에서는 사인(정현)진동과 랜덤진동의 장, 단점과 어떤 규격이 합리적이고 과학적인 근거를 적용하였는지 분석하고 국내외 규격에 대해 각 분석한 자료를 토대로 비교하여 현재 규격의 제, 개정에 대한 판단이나 차후 진행될 규격에 대해 명확하게 제시하고자 한다.

3.1 국내 진동시험규격 분석

국내진동시험규격은 가장 대표적인 규격으로 KS R 9144(철도차량부품의 진동시험방법)와 KS R 9146 (철도차량 부품의 충격 시험방법) 규격을 토대로 분석하고자 한다.

3.1.1 국내진동규격 (KS R 9144) 분석

이 규격은 공진과 기능시험은 함께 실시하면서 시료가 동작 상태에서 시험이 진행된다. 이때 공진의 유, 무를 확인하여 공진이 있는 경우와 공진이 없는 경우를 적용하여 시험을 진행하게 된다. 좀 더 세부적으로 들어가면

3.1.1.1 공진. 기능시험

표 2. 공진시험 규격

기호	진동수 범위 Hz	진동의 크기
1 여객차 부착 품	1 ~ 5	온진폭 5mm
	5 ~ 30	가속도 온진폭 4.9 m/s ²
2 여객차, 기관차 부착 품	1 ~ 5	온진폭 10mm
	5 ~ 30	가속도 온진폭 9.81 m/s ²
3 기관차, 화차, 2축차의 부착 품	3 ~ 7	온진폭 10mm
	7 ~ 40	가속도 온진폭 19.6 m/s ²
4 대차프레임 부착 품	5 ~ 11	온진폭 10mm
	11 ~ 50	가속도 온진폭 49.0 m/s ²
5 대차프레임, 스프링 아래 부분 부착 품	7 ~ 16	온진폭 10mm
	16 ~ 60	가속도 온진폭 98.1 m/s ²
6 스프링아래부분 부착 품	10 ~ 25	온진폭 10mm
	25 ~ 70	가속도 온진폭 245 m/s ²

가속도 온진폭, 진동의 온진폭 및 진동수와의 관계를 식으로 표시하면 (앞에 2는 온진폭)

$$2\alpha = \frac{4\pi^2}{1000} \times 2a \times f^2 \approx 2a \left(\frac{f}{5}\right)^2 \quad \text{----- (1)}$$

여기에서 2α : 가속도 온진폭(m/s²), $2a$: 온진폭(mm), f : 진동수(Hz)

식(1) 이용하여 1 ~ 5 Hz계산해 보면 (단, 진폭(2a)은 5mm)

$$1\text{Hz} : 5\left(\frac{1}{5}\right)^2 = 0.2\text{m/s}^2 \quad \dots\dots\dots 3\text{Hz} : 5\left(\frac{3}{5}\right)^2 = 1.8\text{m/s}^2$$

$$5\text{Hz} : 5\left(\frac{5}{5}\right)^2 = 5\text{m/s}^2$$

위 식을 통해 공진규격 기호 1를 그래프로 나타내보면

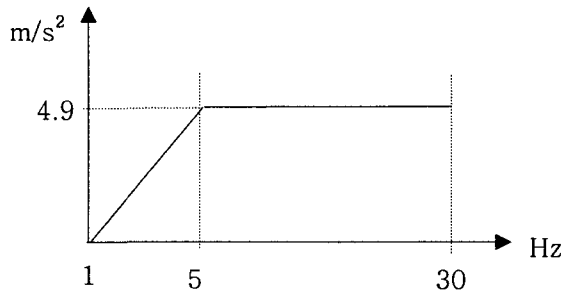


그림 6. 공진규격 그래

시험시간은 공진이 찾을 수 있는 시간으로 보통 왕복 10분을 실시한다.

3.1.1.2 내구성 시험

공진. 기능시험 후 공진 유. 무에 따라서 시험방법이 달라진다.
공진이 없는 경우는 기호2 에 해당할 경우 10Hz에 온진폭 3.5mm, 가속도 온진폭 $13.7m/s^2$ 로 상하 4시간, 좌우2시간, 전후2시간을 시험하게 된다.

표 4. 진동내구시험(공진이 있는 경우)

기 호	주파수	B 종				
		온진폭 mm	가속도 온진폭 m/s^2	시험 시간 h		
				상.하	좌.우	전.후
1	10	1.75	6.86	4	2	2
2		3.5	13.7			
3	20	1.8	28.4			
4	30	2.0	70.6			
5	40	2.3	144			
6	50	3.5	343			

하지만 공진이 있는 경우는 가속도 온진폭에 해당하는 온진폭을 $2amm$ 라고 할때, 각종류는 표 4. 따라 시험한다.

표 3. 진동내구시험(공진이 없는 경우)

구 분	진동수	B종			
		온진폭 mm	시험시간 h		
			상.하	좌.우	전.후
공진상태인 경우	공진진동수	$2.8a$	1	0.5	0.5
공진상태가 아닌 경우	각 주파수 표3. 참조	표3. 참조	3	1.5	1.5

위 표에서 공진상태인 경우 공진 진동수에서 온 진폭이 $2.8a$ 일때 가속도 온진폭을 식 (1)에 따라 구하면

$2a$ 는 계산상 수치가 아니고 온 진폭임을 표시하므로 $2a=1$ 로 볼 때 $2.8a = 2.8/2 = 1.4$ 로 온 진폭에 1.4를 넣어 계산을 하면 된다. (이 표현법으로 인해 계산상에 많은 혼돈을 주고 있어 수정이 필요하다고 볼 수 있다.)

쉽게 풀이하기 위해 내구성시험 중 가장 많이 사용하고 있는 2종 B를 토대로 풀어보면

$$\text{공진 진동수가 10Hz인 경우 : 온 진폭 가속도} = (1.4 \times 3.5) \times \left(\frac{10}{5}\right)^2 = 19.6m/s^2$$

$$\text{공진 진동수가 20Hz인 경우 : 온 진폭 가속도} = (1.4 \times 3.5) \times \left(\frac{20}{5}\right)^2 = 78.4m/s^2$$

공진 진동수가 30Hz인 경우 : 온 진폭 가속도 = $(1.4 \times 30) \times (\frac{30}{5})^2 = 176.4m/s^2$

위 계산을 통해 공진 상태인 경우 공진 진동수의 변경으로 인해 가속도 온 진폭 값이 4배, 9배 상승하는 것을 볼 수 있다.

표 5. 진동내구시험 비교

구 분	주파수 Hz	가속도 온진폭 m/s^2	온진폭 mm
공진상태인 경우	10	13.7	3.5
공진상태가 아닌 경우 (공진이 있는 경우)	10	19.6	4.9
	30	176.4	

위와 같이 실제적인 철도차량에서는 공진진동수가 상승하면 온 진폭 가속도 값도 같이 높아지는 경우가 있을 수 없지만 현재의 국내철도차량 규격은 공진진동수가 높을 수록 온 진폭 가속도 값이 상승하여 공진시험 시 공진주파수가 높은 제품인 경우 공진주파수가 낮은 제품보다 9배 이상의 진동 충격을 받아 치명적인 손상을 주게 되어 시험규격으로서 신뢰 할 수 없는 규격이라 할 수 있다. 참고적으로 진동주파수가 높아 지면 가속도 온 진폭이 높아야 한다는 이론적 근거를 찾아 볼 수가 없다.

이외에도 시험규격을 분석하면서 국내진동규격에서 제시하는 (1)식에서 큰 오류가 있음을 확인 했다.

(1)식에서 진폭과 가속도 진폭이 피크-피크로 표시하기 위해 '온'이라는 표현을 하였고 $2a$, $2a$ 를 사용했는데 실제적인 계산을 해 보면 피크-제로로 표현해야 맞다. 만약 피크-피크가 아니고 피크-제로라고 하면 진폭과 가속도 진폭 값은 2배의 차이가 발생하므로 심각한 문제가 초래되고 있다.

이 문제를 해결하기 위해 이론적인 근거와 타 규격을 비교하여 접근해보면

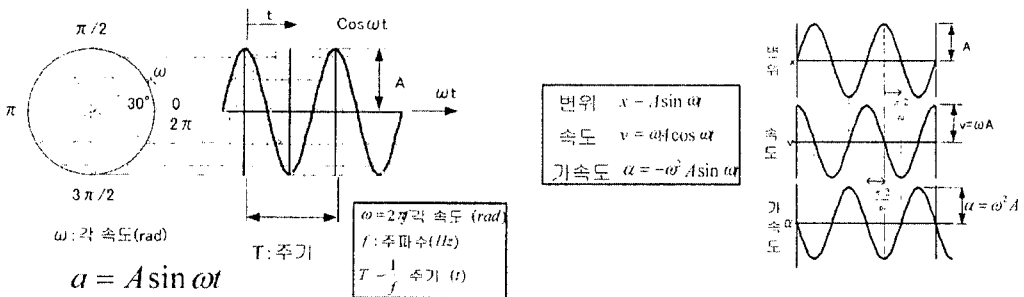


그림 7. 변위, 속도, 가속도의 관계

여기에서 그림 7.를 참조하면 변위나 가속도, 속도를 보면 피크-제로에서 구하는 공식은 $\alpha = -\omega^2 A \sin \omega t$ 일 때 A 는 변위 진폭의 피크치, ω 는 각 진동수 ($2\pi f$)이므로

내구성시험의 (1)식과 동일함을 할 수 있다. 그래서 철도차량과 다른 국내 타 규격은 어떤지 좀 더 조사를 하여 비교 하였다.

표 6. 각 진동규격별 가속도 계산식 비교

철도차량 규격	전기. 전자 규격	자동차 규격
KS R 9144, KS R 9186	KS C 0240	KS R 1034
$2\alpha = \frac{4\pi^2}{1000} \times 2a \times f^2 \approx 2a\left(\frac{f}{5}\right)^2$	$a = (2\pi f)^2 d \times 10^{-3}$	$a = Kf^2 A \times 10^{-3}$ (전기. 전자규격과 동일함)
2α : 가속도 온진폭(m/s ²), 2a : 온진폭(mm), f : 진동수(Hz)	a : 가속도 진폭(m/s ²) d : 편진폭 (mm) f : 진동수 (Hz)	K = 2π ² ≈ 19.74 f : 진동수 (Hz) A : 편진폭 (mm)

철도차량규격과 타 규격을 비교한 결과 철도차량규격만 온 진폭(피크-피크)으로 표기하였고 타 규격들은 편 진폭으로 표기하였다. 그런데 철도차량과 타 규격을 풀어보면 각 계산식이 모두 동일하고 다만 편 진폭(가속도 편 진폭)과 온 진폭(가속도 온 진폭)표기가 상이하다.

$$a = (2\pi f)^2 d \times 10^{-3} = 2a\left(\frac{f}{5}\right)^2 \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} a &= (2\pi f)^2 d \times 10^{-3} = \left(\frac{4 \times \pi^2}{1000}\right) \times 2a \times f^2 = (2\pi)^2 \times 2a \times 0.001 \times f^2 \\ &= (2 \times 3.14)^2 \times 0.001 \times 2a \times f^2 = 0.04 \times 2a \times f^2 \\ &= 0.2^2 \times 2a \times f^2 = 2a\left(\frac{f}{5}\right)^2 \end{aligned}$$

계산에 의하면 전기. 전자규격과 자동차규격은 가속도 수식이 맞고 철도차량규격만 계산식이 잘못되어 국내 철도차량진동의 규격은 새롭게 개정을 해야 될 필요성이 있다. 해결 방법을 제시하면

- (1) 가장 쉬운 방법으로 온 진폭, 온 진폭 가속도를 편 진폭, 편 진폭 가속도로 바꾸고
- (2) 온 진폭, 가속도 온 진폭을 그대로 사용하려면 (1)식×2를 해야 된다.

3.1.2 국내충격규격 (KS R 9146) 분석

충격의 크기는 표 의 각각의 규정 값의 120%까지 낼 수 있는 것으로, 실측값의 허용차는 규정 값의 ±20%의 정밀도로 한다. 충격파형은 반사인파로 실시한다.

충격시간은 0.025초 ±25%로 한다.

표 7. 국내 충격시험 규격

종 류	A 중		B 중		C 중	
	충격의 크기 m/s ²	반복횟 수	충격의 크기 m/s ²	반복횟 수	충격의 크기 m/s ²	반복횟수
1 중	29	4	20	40	9.8	4,000
2 중	88		56		29	

국내충격시험규격이 어떤 근거로 만들어졌는지 파악을 해보면 재료의 피로기준이 되는 S-N곡선(응력 및 반복횟수의 관계선도)에는 여러 가지설이 있는데 진동, 충격 관계규격에 관한 문헌(주요미국규격)에 따르면 S(응력진폭)가 1/2 이 되면 N(응력반복횟수)은 102배로 따라 공시품이 희망하는 내구력을 갖는지 여부를 명확히 할 수 있는 셈이다. 구 국철철도기술연구소 차량운동연구실에 의해 측정된 실측결과에 따르면 철도차량의 앞뒤충격은 연결 시에 발생하는 것이 가장 크고, 화물차의 경우에 최대 복(은) 진폭(충격의 크기)이 29m/s², 여객차의 경우에 9.8m/s²이었다. 충격의 크기는 연결 장치의 완충기의 성능에 따라 다르다.

차량의 연결은 열차의 편성 및 조성 변경 시에 이루어지는 것은 당연하다. 편성 및 조성변경을 하루 평균 1회로 보면 1년 365회, 10년에 3,650회가 된다. 부품의 내구희망기간을 일단 10년으로 하면 내구희망의 반복횟수는 4,000회가 되며 이 횟수의 산출은 엄밀하지는 않지만 개략산출로 타당하다
충격시험의 C종의 반복횟수의 4,000회는 이렇게 정한 것으로 B종은 반복횟수가 1/100이 되고 있으므로 충격의 크기는 설정의 2배로 확대되어 있다. A종은 B종에 비해서 반복횟수를 다시 1/10로 하고, 충격의 크기를 근사하게 $\sqrt{2}$ 배로 확대하고 있다.

3.2 해외 진동시험규격 분석

해외진동시험규격은 가장 대표적인 규격으로 IEC 61373(Railway applications rolling stock equipment shock and vibration tests, 1999) 규격을 토대로 분석하고자 한다. IEC 61373규격은 기능적 임의테스트, 모의적 수명 테스트, 충격테스트로 분류되고 어떤 근거로 만들어 졌는지 파악을 해보면

표 8. 조사를 통해 확보한 r.m.s 가속수준 요약

시험방향	최대레벨	평균레벨	표준편차
Z	1.24	0.49	0.26
X	0.43	0.29	0.08
Y	0.82	0.30	0.20

$$T_s A_s^m = T_t A_t^m \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기에서 T_s : 서비스 수명기간, T_t : 시험시간, A_s : 서비스 가속, A_t : 시험 가속위 식을 이항하면 다음과 같은 등식이 성립

$$\frac{A_t}{A_s} = \left[\frac{T_s}{T_t} \right]^{1/m} \quad \text{-----} \quad (3)$$

가속비는 다음과 같은 시간인자가 된다.

$$\text{Time factor} = \left[\frac{T_s}{T_t} \right]^{1/m} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$T_s = \text{일반 수명의 25\%로 볼때 } 25\text{년 수명} \times 300\text{일/년} \times 10\text{시간/일} \times 25\% \\ = 18,750 \text{ hr}$$

$$T_t = \text{시험시간 } 5 \text{ hr}$$

$$m = 4 \text{ (금속의 전형적 수치)}$$

$$\text{가속 비} = \left(\frac{18,750}{5} \right)^{1/4} = 7.83$$

차체 B등급 기능적 임의 시험수준 = 평균서비스 수준 + 2개의 표준편차

모든 등급 기능적 임의 시험수준 = 평균서비스 수준 + 1개의 표준편차

모의 수명 임의 시험수준 = 기능적 시험수준 × 가속비

표 9. 기능적 임의수명과 모의적 수명 Class A규격

시험 방향	기능적 임의 수명 RTL	모의적 수명 RTL
Z	0.75	5.9
X	0.37	2.9
Y	0.50	3.9

$$\text{평균서비스수준(AS)} = 0.49$$

$$\text{표준편차(STD)} = 0.26$$

$$\text{기능적 임의 수명 시험수준} = \text{AS} + \text{STD} = 0.49 + 0.26 = 0.75$$

$$\text{모의적 수명시험 수준} = \text{기능적 임의 수명 시험수준} \times \text{가속비} \\ = 0.75 \times 7.83 = 5.9$$

기능적 임의 수명과 모의적 수명은 위와 같이 계산되며 계산된 자료를 가지고 스펙트럼화 하여 규격화 시키면

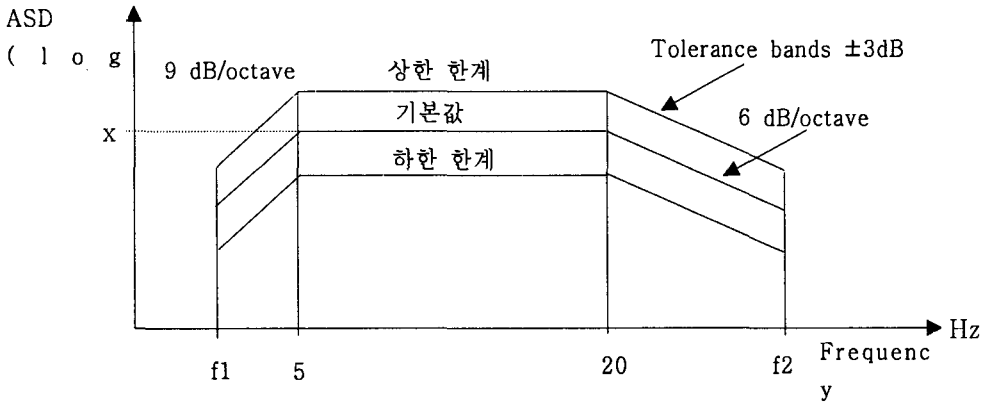


그림 8. 기능적 임의 수명 및 임의적 수명 스펙트럼

시료 무게 < 500 kg : $f1 = 5 \text{ Hz}$ $f2 = 150 \text{ Hz}$

시료 무게 > 500 kg < 1250 kg : $f1 = \frac{1250}{\text{무게}} \times 2 \text{ Hz}$ $f2 = \frac{1250}{\text{무게}} \times 60 \text{ Hz}$

시료 무게 > 1250 kg : $f1 = 2 \text{ Hz}$ $f2 = 60 \text{ Hz}$

상한, 하한 주파수가 무게에 따라 상이하게 되어 있어 시험장비상에서 시험이 불가능한 부분을 만족해 주고 있다.

3.3 국내, 외 철도차량 진동시험규격 비교 분석

국내, 외 철도차량의 가장 큰 차이는 국내의 사인(정현)진동과 해외규격의 랜덤진동의 차이로 사인진동과 랜덤 차이를 비교하고 국내, 외 규격을 비교 분석하고자 한다.

3.3.1 사인(정현)진동과 랜덤진동의 차이점

사인 스위프는 항상 반복된 시험을 진행하고 규격을 개정하더라도 특별한 차이가 없고 시험시간과 주행거리 간에는 상관관계가 없지만 랜덤규격은 운행 중인 진동데이터를 측정하여 확률론적, 통계적으로 평가한 후 가속화하여 시험시간을 원하는 대로 조절할 수 있다.

(1)등가시험 시험확장 계수와 시험시간관계(MIL-STD810D)

$$\lambda = \alpha^{-6.2877} \text{ ----- (5)}$$

(2)등가 PSD에 대한 식은

최종시험 PSD : $W(f) = \text{평균 PSD} + 1.2 \times (\text{편차 PSD})$

단, 평균 PSD = $[\alpha_1^2 \times W_1(f) + \alpha_2^2 \times W_2(f) + \alpha_3^2 \times W_3(f)]/3$

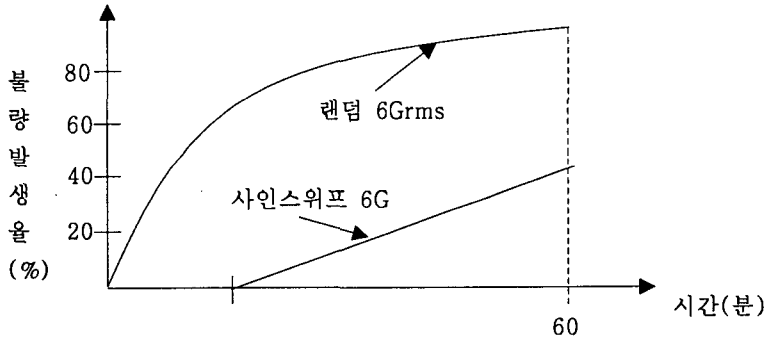
$$(\text{편차 } PSD)^2 = [\alpha_1^2 \times W_1(f) - \text{평균 } PSD^2 + \alpha_2^2 \times W_2(f) - \text{평균 } PSD^2 + \alpha_3^2 \times W_3(f) - \text{평균 } PSD^2] / 3$$

상기와 같은 계산식을 통하여 시험시간을 단축 할 수 있다.

사인진동규격은 순차적인 주파수 가변으로 실제 환경에는 많이 존재 하지 않는 시험이지만 진동 주파수가 함께 발생되기 때문에 실제 환경과 비슷하다.

시험시간대비불량율의차이를 보면 극명하게 랜덤시험의 장점을 알 수 있다.

국내진동규격(사인스위프)은 공진에서만 진동스트레스를 집중적으로 받는데 공진시간이 짧기 때문에 불량율이 적어 제품(부품)의 불량률이 적고 공진시험을 통해 공진주파수에서 시험을 해도 실제적인 제품의 공진에서 시험이 되고 있는지 정확하게 판단하기가 어렵다(진동지그, 가속도센서 위치 등) 이를 해결하기 위해 진동시험시간이 길고 옥타브를 적용하여 최대한 실제 진동과 맞추려고 하지만 한계가 있지만 해외진동규격(랜덤진동)은 각 주파수가 한번에 포함이 되어 진동이 되므로 항상 공진주파수는 물론 타 주파수가 존재하고 있어 복합적인 진동스트레스(필드 진동과 같음)을 주어 제품(부품)의 불량율을 짧은 시간에 높게 나올 수 있는 장점이 있다



랜덤시험으로는 약 10분간의 시험으로 거의 모든 불량률이 발견되는 것에 비해 사인스위프 시험으로는 60분간 시험하여도 랜덤의 경우보다도 불량 발생율이 떨어진다.

3.3.2 국내. 외 규격의 비교 분석

국내규격과 해외규격의 가장 중요한 차이는 해외규격 인 경우 실제적인 환경을 직접 측정하고 분석하여 통계적인 기법을 이용한 데이터를 진동가속을 통해 실제에 일어나고 있는 진동규격을 개발하고 있고 세계유수의 회사들도 각각 회사에 맞는 규격을 개발하여 사용하고 있다. 하지만 국내규격은 십년이 넘는 규격으로 과학적이고 합리적인 규격보다는 단순한 사인진동을 이용하여 가속도-주파수-진폭을 이용하여 정현파 진동시험이 이루어지고 있다. 실제적인 진동환경보다는 순차적인 주파수를 이용하여 시험하고 이를 해결하고자 시료의 공진을 찾아 공진주파수에서 시험을 하지만 그 공진

주파수는 시료의 취약한 주파수로 실제 환경에서는 전혀 문제가 되지 않는 주파수일 확률이 높는데 내구성시험 후 문제발생 시 해결하기 위해 많은 돈과 시간을 투자하지만 실제 진동이 받는 환경과 달라 실효를 갖지 못하는 신뢰성 시험이 되고 있다. 그리고 국내규격에 적용하고 있는 사인(정현)스위프 시험규격은 단순한 정현진동으로 어느 회사나 제품(기기)별 차이가 많이 나지 않는다.

주파수 및 시험시간을 보면

국내규격은 주파수가 1~30Hz(가장 많이 사용), 10~150Hz이지만 공진 진동시험 시 사용되는 주파수로 실제 진동시험은 내구성시험인데 공진이 있는 경우 공진주파수에서 시험하고 공진이 없는 경우 10Hz이나 40Hz 단일주파수에서 진동시험을 진행하므로 실제적인 필드진동과 상관없이 시험이 진행하게 된다. 시험시간은 보통 상하 4시간, 좌우, 전후 각각 2시간이나 상하, 좌우, 전후 동일하게 2.5시간을 실시한다. 그 반면 해외규격은 5~150Hz로 주파수 범위가 비슷해 보이나 기능시험이나 모의시험(내구성시험)시 주파수가 동일하게 5~150Hz시험으로 상하, 좌우, 전후 각 5시간씩 시험을 진행하고 주파수 범위는 각 전문가와 글로벌회사 리서치조사를 통해 나온 주파수 구간이므로 합리적이고 과학적이라 볼 수 있다.

가속도 값을 보면 국내규격 사인스위프 진동시험은 가속도 값이 공진이 있는 경우 고주파수일수록 가속도 값이 상승하게 되어 있어 불합리하고 진폭과 가속도, 주파수 계산이 맞지 않는 규격오류가 발생하고 있다. 하지만 해외규격 랜덤시험은 필드데이터와 비슷한 가속도 값을 적분하여 전체면적을 통계적으로 계산되어 신뢰 할 수 있는 데이터라 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내, 외 철도차량 진동시험 규격에 대해 분석을 하여 국내규격의 문제점을 확인하였다. 신 개념의 철도차량이 개발되어지고 확산되어지는 시점에서 국내 진동 규격(사인스위프)보다 랜덤규격이 합리적이고 과학적이므로 해외규격인 랜덤진동 시험으로 제정하여 시행하여야 한다. 이미 세계적으로 유명한 회사들이나 MIL-STD 규격, 자동차시험 및 유통환경(물류)시험에서는 랜덤시험을 적용하고 있고 시장불량과 가장 근사한 문제점을 확인하여 많은 개선이 이루어지고 있다. 현재 추세는 랜덤진동을 어떻게 더 합리적이고 과학적으로 시장필드와 동일한 조건으로 짧은 시간에 규격을 제, 개정 할 것인가가 이슈화 되고있지만 선박과 철도차량에만 사인스위프 시험규격이 적용되고 있다. 차후 진동시험은 합리적이고 통계적인 랜덤 진동시험으로 대체되어야 하고 각 차량에 맞는 진동시험의 규격이 필요 할 때이다. 추후 연구과제는 사례연구로 국내철도차량에 대해 실제 운영되는 구간에 대해 진동을 측정하고 분석하여 철도차량에 해당하는 랜덤 진동시험규격에 대한 적합성 평가와 랜덤진동을 이용한 신 개념의 철도차량의 규격을 개발하고자 한다.

5. 참고 문헌

- [1] 건설교통부, 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준, 2000
- [2] 건설교통부, 도시철도용품의 품질인증요령, 2000
- [3] 신뢰성 해외전문가 초청세미나 진동시험기술, 한양대학교 신뢰성분석연구센터 책자, 2004
- [4] The 2006 International Forum on Advanced Reliability, 한양대학교 신뢰성분석연구센터 책자, 2006
- [5] KS R 9186, 철도신호 보안부품 - 진동시험방법, 한국표준협회, 1996
- [6] KS R 9144, 철도 차량 부품의 진동 시험방법, 한국표준협회, 2004
- [7] KS R 9156, 철도차량용 전자기기의 시험통칙, 한국표준협회, 2002
- [8] KS R 9146, 철도차량 부품의 충격 시험방법, 한국표준협회, 2002
- [9] KS R 9187, 철도신호 보안부품 - 충격시험방법, 한국표준협회, 2003
- [10] KS C 0292, 환경시험방법-전기 전자-광대역랜덤 진동시험 방법 및 지침, 한국표준협회, 2002
- [11] KS C 0240, 환경시험 방법(전기.전자) 정현파 진동시험 방법, 한국표준협회, 2003
- [12] KS C IEC 60068-3-8, 지원문서 및 지침-진동시험의 선택, 한국표준협회, 2005
- [13] KS A ISO 13355, 수송포장화물과 단위화물의 수직 랜덤 진동시험방법, 한국표준협회, 2004
- [14] KS A ISO 2247, 고정주파수에서 수송포장화물 및 단위적재화물의 진동시험방법, 한국표준협회, 2003
- [15] KS A ISO 8318, 가변주파수를 이용한 수송포장화물 및 단위적재화물의 정현파 진동시험방법, 한국표준협회, 2003
- [16] IEC 61373, Railway applications rolling stock equipment shock and vibration tests, 1999
- [17] IEC 60068-2-27, Environmental testing. Part 2: Tests. Test Ea and guidance: Shock, 1987
- [18] IEC 60068-2-47, Environmental testing - Part 2-47: Test - Mounting of specimens for vibration, impact and similar dynamic tests, 2005
- [19] IEC 60068-2-57, Environmental testing - Part 2-57: Tests - Test Ff: Vibration-Time-history method, 1999
- [20] IEC 60068-2-64, Corrigendum 1 - Environmental testing - Part 2: Test methods-Test Fh: Vibration, broad-band random (digital control) and guidance, 1993
- [21] MIL-STD-810D, 미국방성 시험표준, 1983
- [22] BRB/LU LTD RIA Specification No.20, Requirements for Vibration and Shock Testing of Equipment for Railway Vehicles, 1995